PRINCIPIOS BASICOS

1.8 LA PÉRDIDA.

En este capítulo veremos como se produce una situación que, no controlada y según en que circunstancias se produzca, puede entrañar un alto riesgo para la integridad física de los pasajeros y del aparato: la pérdida.

La pérdida (en inglés stall) es el efecto provocado por la incapacidad del ala para seguir produciendo sustentación, y se produce cuando el avión vuela con un ángulo de ataque mayor que el ángulo de ataque crítico. No hay nada mágico en este ángulo, la sustentación no cae a cero, es más, en este punto es donde se alcanza el coeficiente máximo de sustentación. Lo que sucede es que pasado este ángulo critico disminuye la sustentación y la resistencia se incrementa dando lugar a la entrada en pérdida.

Para tener una idea de como se produce la pérdida físicamente, veamos primero unos conceptos sencillos sobre fluidos:

1.8.1 Capa laminar y capa turbulenta.

Flujo laminar. Es un flujo en el cual el fluido puede ser considerado que se mueve en capas uniformes denominadas *laminas.*

Flujo turbulento. En este tipo de flujo las láminas fluyen desorganizadas, tanto en su dirección como en su velocidad.
En el espacio libre el flujo no interactua con los objetos, pero si un objeto está cercano al flujo del fluido, interactua con el mismo cambiando sus características de velocidad como veremos seguidamente.

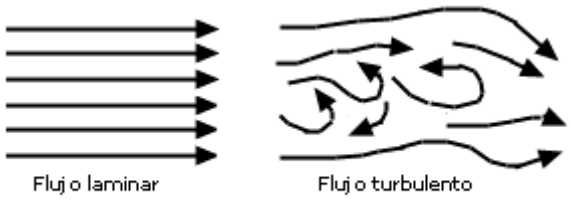

Fig.1.8.1 - Flujo laminar vs. Flujo turbulento.

El flujo puede permanecer laminar en tanto las laminas no interactuan lo suficiente para causar movimientos secundarios entre ellas, pero en caso contrario la mezcla libre y aleatoria de las láminas hacen el flujo turbulento.

El flujo puede cambiar de laminar a turbulento en base a:

1. Un cambio en la velocidad del flujo.
2. Alteraciones del propio flujo.
3. Rugosidad de la superficie sobre la que fluye.
4. Los gradientes de presión. Cuando la presión estática decrece con la distancia a lo largo del flujo, las alteraciones en el flujo se amortiguan; cuando esta presión aumenta, las alteraciones se amplifican. La reducción de presión estática en la sección delantera del ala ayuda a mantener el flujo laminar. (1.8.3)
5. Otros factores: densidad del fluido (P), su velocidad (V), la longitud (L=cuerda del ala en este caso) y el coeficiente de viscosidad (u), que los ingenieros relacionan en un número dimensional llamado número de Reynolds **R=(PVL)/u**.

Cuando un fluido fluye sobre una superficie, debido a la fricción, la capa más cercana a la superficie se detiene completamente. Encima de esta capa se forman otras, cada una de las cuales tiene menos fricción que la anterior y por tanto mayor velocidad. Así hasta que a partir de una capa concreta no hay fricción y las capas tienen la velocidad libre del fluido.

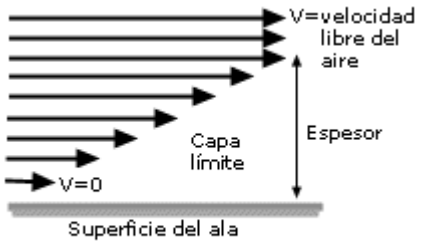

Fig.1.8.2 - Capa límite.

Al conjunto de capas que van desde la que tiene velocidad cero (la más cercana al ala) hasta la que tiene velocidad libre se le llama capa límite, y a la distancia entre la primera y la última espesor de la capa límite.

El espesor de la capa límite suele aumentar a medida que el fluido se mueve a lo largo de la superficie. La cantidad de este aumento depende de la viscosidad del fluido, la velocidad del flujo, la suavidad/rugosidad de la superficie, y la forma de esta.

A la capa límite cuyo flujo es laminar se le suele llamar capa límite laminar que a veces se abrevia como capa laminar, mientras que si el flujo es turbulento la capa recibe el nombre de capa límite turbulenta, abreviada como capa turbulenta.

Cuando la capa límite comienza a fluir por el borde de ataque del ala lo hace en forma de capa laminar, pegada al ala y muy fina; pero a medida que fluye hacia el borde de salida, mas o menos por el centro del ala, comienza a perder velocidad debido a la fricción y se va haciendo capa turbulenta, más separada del ala y con más grosor. Mientras la capa es laminar, se mantiene pegada al ala y produce sustentación, pero al convertirse en turbulenta aumenta su separación del ala y no produce sustentación. El punto en el cual la capa laminar se va convirtiendo en turbulenta e incrementa su grosor se denomina "transición a turbulencia" o "transición de capa límite".

1.8.2 Como y porqué se produce.

Ya estamos en condiciones de saber como entra en pérdida un ala. Con moderados ángulos de ataque el flujo de aire sigue el contorno de la superficie del ala y el punto de transición a turbulencia se mantiene cercano al borde de salida (1); pero a medida que el ángulo de ataque se incrementa (2), el flujo de aire tiene mayor dificultad para seguir el contorno del ala debido al intenso cambio de dirección y el punto de transición se va desplazando hacia el borde de ataque (3); cuando el ángulo de ataque es mayor que el ángulo crítico, el aire es incapaz de seguir el contorno del ala, el punto de transición está tan adelantado que apenas hay capa laminar y casi toda es turbulenta (4). En ese momento la presión diferencial se ha reducido y la resistencia se ha incrementado, hasta el punto de que no hay sustentación suficiente para soportar el peso del aeroplano y el ala entra en pérdida.

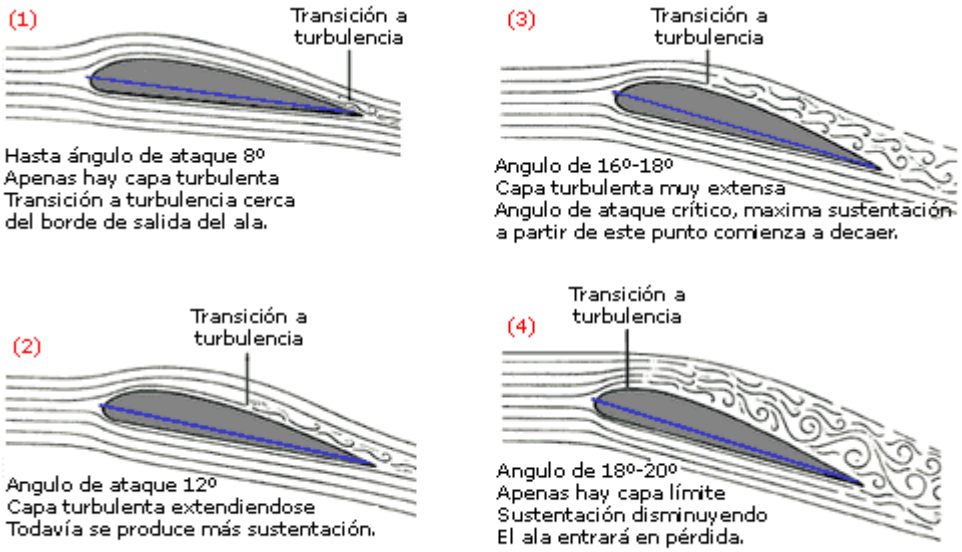

Fig.1.8.3 - Incremento del ángulo de ataque y entrada en pérdida.

La pérdida es un fenómeno exclusivamente aerodinámico que se produce por un excesivo ángulo de ataque. Conviene recordar que el ángulo de ataque está formado por la cuerda del ala y la dirección del viento relativo, la cual no tiene porqué coincidir con la dirección a la que apunta el morro del avión.
Insisto, la pérdida se debe a un excesivo ángulo de ataque y puede ocurrir con cualquier velocidad, cualquier actitud y cualquier potencia.

1.8.3 Velocidad de pérdida.

Según vimos en el capítulo anterior, los aviones no tienen normalmente indicadores de ángulo de ataque pero si indicador de velocidad, que nos da una buena información sobre el ángulo de ataque. Esta es la razón por la cual se habla de velocidades de pérdida y como tales vienen tabuladas en los manuales. En estas, el constructor suele indicar la velocidad que corresponde al ángulo de ataque que provoca la entrada en pérdida, según distintos factores (grados de alabeo, peso...). Esta velocidad aumentada en un 5% a 10%, se denomina velocidad de pérdida.

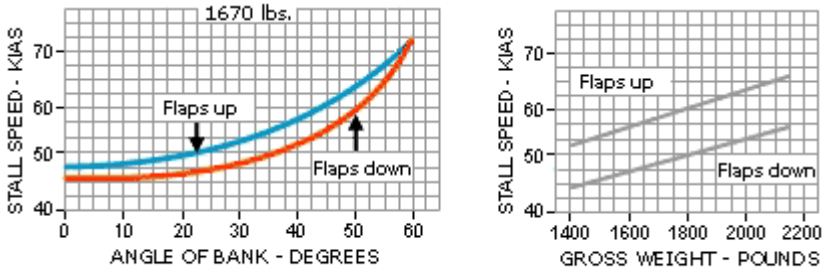

Fig.1.8.4 - Velocidad de pérdida según distintos factores.

Hay dos aspectos que conviene conocer respecto al ángulo de ataque crítico y la velocidad de pérdida. Cada perfil en particular tiene un ángulo de ataque, normalmente entre 16º y 20º, en el cual el flujo de aire se separa del ala y esta entra en pérdida. Aunque los expertos en aerodinámica dicen que el ángulo de ataque crítico no es siempre una constante absoluta, a efectos prácticos se considera constante, con independencia del peso, la presión aerodinámica, el ángulo de alabeo, etc... o sea, que cada aeroplano tiene un ángulo de ataque crítico específico, el cual corresponde al coeficiente máximo de sustentación **CL**.
Por el contrario, la velocidad de pérdida de un aeroplano dado no tiene un valor fijo y constante para todas las situaciones de vuelo, pues los factores anteriores si que la afectan.

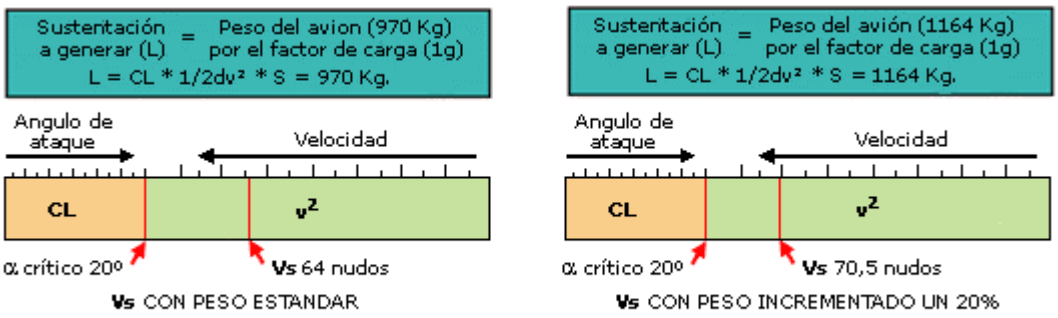

Fig.1.8.5 - Variación de la velocidad de pérdida (Vs) con el peso.

En la fig.1.8.5 se muestra un ejemplo de lo expuesto. Supongamos que volamos recto y nivelado a 80 nudos en un avión cuyo peso total es de 970 kg.; si ahora levantamos el morro del avión a un ángulo de ataque de 20º (se asume que ese es el ángulo crítico), el avión decelerará rápidamente; con velocidad de 70.5 nudos la sustentación generada (L) es suficiente, pero con el anemómetro marcando 64 nudos es insuficiente y el avión entrará en pérdida. Si repetimos la experiencia, pero ahora con un peso total de 1164 kg., al llegar a la velocidad de 70,5 nudos, la sustentación generada, que hubiera sido suficiente para mantener el peso anterior, es insuficiente y el aeroplano entrará en pérdida.
De nuevo: el ángulo de ataque crítico es constante para cada perfil, la velocidad de pérdida varía con determinadas condiciones.

La omisión de los valores de **S** (Superficie alar) y **d** (densidad) en el gráfico anterior no es casual. La superficie alar es constante (salvo que se extiendan flaps, que no es el caso), por lo cual se puede omitir para este ejemplo, pero ¿y la densidad?. Pues sucede que el anemómetro mide diferencias de presiones (estática y de impacto) y las transforma en velocidades relativas. La variación en la densidad del aire que afecta a la sustentación, afecta de la misma manera al anemómetro, de lo cual resulta que este opera como si corrigiera de forma automática estas variaciones. En otras palabras: las velocidades críticas del aeroplano (Vs, Vx, Vy...) NO se corrigen por el factor densidad, el anemómetro ya lo hace (ver Notas).

1.8.4 Condiciones que afectan a la pérdida.

El peso del avión. Las velocidades de pérdida tabuladas por el fabricante son para un peso determinado del avión, es decir que por debajo de esa velocidad un avión con el peso dado entra en pérdida. Pero si el peso es mayor, la entrada en pérdida se producirá antes pues antes se dará el déficit de sustentación. En definitiva, al aumentar el peso del avión aumenta también la velocidad de pérdida.
Por otra parte, si el peso del aeroplano es inferior al tabulado por el fabricante, el porcentaje de reducción de la velocidad de pérdida es la mitad del porcentaje de reducción del peso. Por ejemplo: si se reduce el peso un 10%, la velocidad de pérdida se reduce solo un 5%.

Balance de la carga. Aunque por si mismo no supone un aumento o disminución de la velocidad de pérdida, una deficiente distribución de la carga si puede afectar, y muy negativamente, a las características de la pérdida (ver los capítulos 4.2 y 4.3).

La configuración del avión. Los dispositivos hipersustentadores (flaps o slats) aumentan la sustentación del avión, con lo cual la velocidad de entrada en pérdida con ellos extendidos es menor que con el avión "limpio" (dispositivos sin extender).

La potencia aplicada. Normalmente el eje de propulsión está ligeramente desplazado hacia arriba respecto al eje longitudinal del avión. Debido a esto, existe una pequeña fuerza de sustentación, que corresponde al vector vertical de la propulsión. Esta sustentación adicional es pequeña y no merece tenerse en cuenta respecto a la velocidad de pérdida, pero si que afecta a las características de pérdida que son ligeramente distintas según se produzca con o sin potencia aplicada.

El factor de carga. Se detalla a continuación.

1.8.5 El factor de carga.

El factor de carga es la relación que existe entre la carga total soportada por las alas y el peso bruto del avión con su contenido (Carga soportada / Peso bruto del avión = Factor de Carga).

Como el peso se debe a la fuerza de la gravedad, el factor de carga se suele expresar en términos de relación con ella: en "g". Así un factor de carga de 3 "ges" significa que la carga sobre la estructura del avión es de 3 veces su peso actual. Por ejemplo: si el avión pesa 1000 kg. se está soportando una carga de 3000 kg. (1000*3=3000).

Este factor puede ser positivo o negativo. Es positivo (g positiva) cuando la fuerza es hacia abajo, y es negativo (g negativa) cuando es hacia arriba; en las g positivas el peso del piloto aumenta quedando "pegado" al asiento, mientras que en las g negativas el peso disminuye y el piloto "flota" en el asiento.

El factor de carga es importante por dos razones: Por la sobrecarga estructural impuesta a las alas, que pueden llegar a romperlas, y porque la velocidad de pérdida se incrementa en proporción al factor de carga.

Durante el vuelo, las alas del aeroplano deben soportar todo el peso de este; en la medida en que se mueva a una velocidad constante y en vuelo recto, la carga impuesta sobre las alas es constante (1g) y un cambio de velocidad en esta situación no produce cambios apreciables en el factor de carga. Pero si el cambio es de trayectoria, hay una carga adicional al peso del avión, más acusada si este cambio se hace a alta velocidad y bruscamente. Esta carga adicional se debe a la fuerza centrífuga, que es la fuerza de inercia que se manifiesta en todo cuerpo cuando se le obliga a variar de dirección (horizontal o vertical).
Por tanto cualquier cambio de trayectoria del avión implica en mayor o menor medida una fuerza centrífuga que incrementa el factor de carga. Cualquier fuerza aplicada a un avión que lo saque de su trayectoria produce tensión sobre su estructura, el total del cual es el factor de carga.

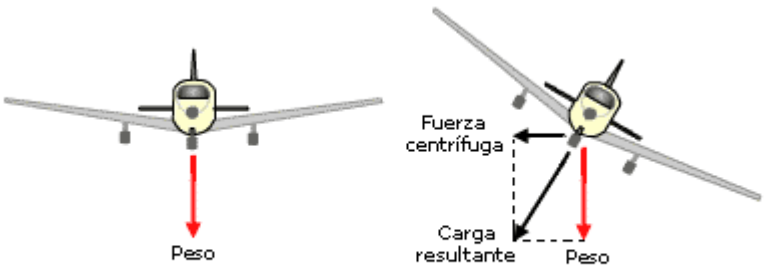

Fig.1.8.6 - Factor de carga en virajes.

El factor de carga en vuelo recto. Si en vuelo recto y nivelado se tira bruscamente del volante o palanca de control hacia atrás, el avión se encabritará (morro hacia arriba) y entrará en una trayectoria de curva hacia arriba lo cual incrementa el factor de carga.

El factor de carga en los virajes. En cualquier avión, a cualquier velocidad, si se mantiene una altitud constante durante un giro coordinado, el factor de carga para un determinado grado de inclinación es el mismo (ver cap.5.7).

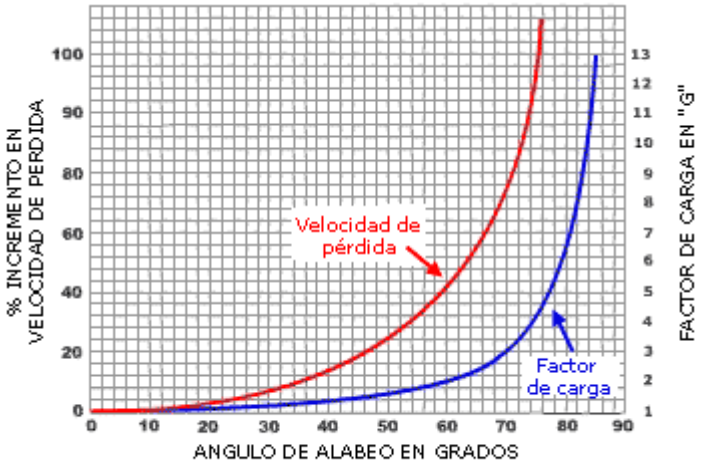

Fig.1.8.7 - Velocidad de pérdida y factor de carga s/alabeo.

La figura revela un factor importante en los virajes: el factor de carga se incrementa lentamente hasta unos 40º (g=1.31), algo mas deprisa hasta unos 60º (g=2) y a partir de ahí explosivamente, llegando a tomar el valor 4 para 75º y 5.76 para 80º. Es importante recordar que las alas deben producir sustentación igual al factor de carga pues de otra manera sería imposible mantener la altitud.

Aunque un avión puede ser alabeado a 90º, un giro a altitud constante con esta inclinación es imposible matemáticamente para aviones convencionales. A algo más de 80º el factor de carga supera los 6 Gs que es generalmente el límite estructural en aviones diseñados para vuelo *acrobático*. Para aviones convencionales ligeros el máximo alabeo en un giro a altura constante es de 60º. Un incremento de 10º supone 1 G de carga adicional, que pone al aeroplano muy cerca del punto de tensión que puede provocarle daños estructurales.

Factor de carga en turbulencias. Aunque los aviones están diseñados para soportar ráfagas de considerable intensidad, la aceleración impuesta por estas supone un incremento del factor de carga, particularmente sobre las alas. Este incremento es proporcional a la velocidad del avión. Por eso en condiciones de turbulencia moderada o extrema conviene reducir la velocidad del avión a la velocidad de maniobra especificada por el fabricante.

Relación entre el factor de carga y la pérdida. La velocidad de pérdida se incrementa en un factor igual a la raíz cuadrada del factor de carga; es decir que si un avión tiene una velocidad normal de pérdida de 50 kts, entrará en pérdida a 100 kts si se le aplica un factor de carga de 4g ($50*\sqrt{4}=100$). Por ejemplo, sabemos que en un giro de 60º el peso del avión se duplica (2g), y por tanto la velocidad necesaria para producir sustentación se multiplica por $\sqrt{2}$, es decir por 1.4142; si en vuelo normal el avión entra en pérdida a 65 kts, en un giro de 60º entraría en pérdida a 92 kts (65*1.4142).
El aumento de la velocidad de pérdida debe ser tenido muy en cuenta en maniobras donde el factor de carga sufre un gran incremento (giros cerrados, espirales, etc.). Por la misma razón, no debe hacerse tampoco una pérdida intencionada por encima de la velocidad recomendada, ni efectuar movimientos bruscos a alta velocidad, p.ejemplo: levantar el morro de forma súbita.

Categorías. Todos los aeroplanos están diseñados cumpliendo unos requerimientos de esfuerzo, en función del uso que se vaya a hacer del mismo. La clasificación según estos requisitos se denomina categorías. Para obtener su certificación por las autoridades competentes, el esfuerzo estructural (factor de carga) debe ser conforme a los estándares prescritos. Las categorías y el máximo factor de carga para cada una de ellas son las siguientes (según la F.A.A):

- Normal : 3.8 G.
- Utility : 4.4 G.
- Acrobatic: 6 G.

1.8.6 Diseños que atenúan la pérdida.

Para mantener la capa laminar fluyendo sobre la superficie del ala tanto como sea posible, se ha desarrollado el tipo de ala de flujo laminar. Este diseño está relacionado con el punto de transición.

El ala de flujo laminar es a veces más fina que una convencional, el borde de ataque es más puntiagudo y la sección más cercana al mismo simétrica, pero lo más importante de todo, el punto de máximo espesor está mucho más atrás (aproximadamente en el 50% de la cuerda) que en un ala convencional (que suele darse en el 25% de la cuerda). La distribución de presiones es mucho más uniforme y el flujo de aire es acelerado muy gradualmente desde el borde de ataque al punto de máximo espesor. Además, esto supone reducir la resistencia considerablemente, pues el ala laminar exige menos energía para deslizarse a través del aire.

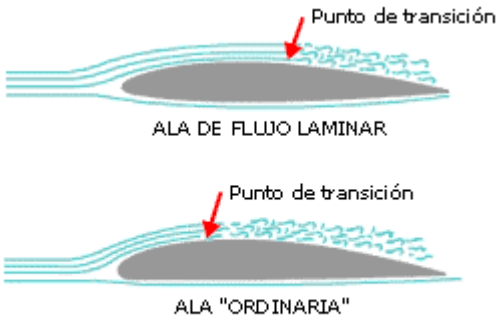

Fig.1.8.8 - Ala "ordinaria" y de flujo laminar.

En este perfil sin embargo, en las cercanías de la pérdida el punto de transición a turbulencia se desplaza hacia el borde de ataque más rápidamente que en un ala convencional.

No es deseable que el extremo del ala entre en pérdida lo primero, sobre todo si el extremo de un ala entra en pérdida antes que el otro, lo cual no es infrecuente. En un ala con buena característica de pérdida, la raíz (pegada al fuselaje) debe entrar en pérdida antes que el extremo. Este tipo de pérdida decrece la tendencia al alabeo e incrementa el control lateral en las cercanías de la pérdida (Ver 1.6).
Para conseguir este efecto se recurre a uno o varios de los siguientes diseños:

- Construir las alas con ángulo de incidencia decreciente desde la raíz hacia el extremo ("torsión") lo que implica menor ángulo de ataque en la punta del ala y por tanto un retardo a entrar en pérdida respecto a la raíz. Este diseño recibe el nombre de "washout" en inglés.
- Insertar una tira "strip" de metal en el borde de ataque más cercano a la raíz del ala, de forma que cuando se alcanza un determinado ángulo de ataque, la tira rompe el flujo de aire haciendo que la raíz entre en pérdida antes que el extremo del ala.
- Diseñar unas ranuras en el borde de ataque cercano a la punta del ala, de manera que con altos ángulos de ataque se suaviza el flujo de aire en esa parte del ala retrasando su entrada en pérdida respecto a la raíz.

Otra buena característica es que al entrar en pérdida el morro caiga abajo, lo cual nos ayudará en la recuperación. Esto se consigue dando al estabilizador horizontal de cola un ángulo de incidencia mucho menor que a las alas (decalaje). De esta manera cuando un excesivo ángulo de ataque deja las alas sin sustentación suficiente, la cola sigue teniendo sustentación, haciendo que el avión caiga de morro y sea más fácil la recuperación de la pérdida.

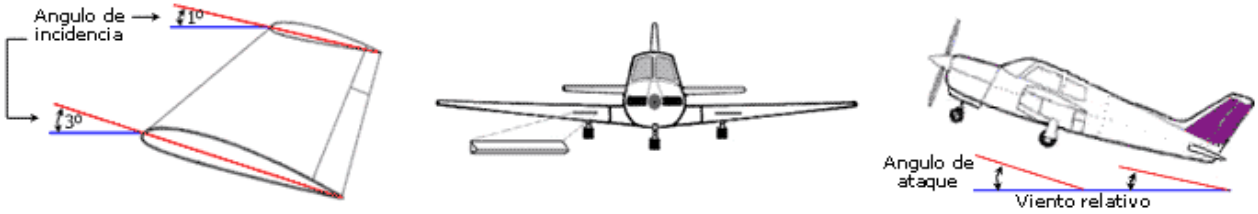

Fig.1.8.9 - Diseños con buena característica de pérdida.

Además de la resistencia a la pérdida, en el diseño de las alas hay que tener también en cuenta el factor de carga a soportar, y llegar a un compromiso de manera que el ala entre en pérdida antes de que sobrepase el factor de carga máximo, puesto que es preferible tener un avión en pérdida (que es recuperable) que sin alas (que es irrecuperable).

Efecto de los flaps. Al extender los flaps se cambia la curvatura del perfil del ala (Flaps 1.5.3) lo cual produce unos efectos ya conocidos (Efecto que producen los flaps 1.5.3). Pero además, la parte del ala donde están instalados vuela con mayor ángulo de incidencia y por tanto con mayor ángulo de ataque, que la parte del ala sin flaps. A consecuencia de esto, la sección del ala con flaps debe entrar en pérdida antes que el resto del ala. Esta es la razón por la cual los fabricantes colocan los flaps en la raíz del ala.
Puede parecer paradójico, pero es 100% cierto que aunque la sección de ala con flap es intrínsecamente más resistente a la pérdida, entrará en pérdida antes que el resto del ala.

En el capítulo 6.1 de la sección Técnica de Vuelo (II), se detallan los distintos tipos de pérdida que pueden darse, como practicarlas y como proceder a la recuperación de las mismas.

Notas:

En las tablas y gráficos de los manuales de operación, los fabricantes indican las velocidades de pérdida para un peso, configuración, y grados de alabeo (factor de carga) determinados (la fig.1.8.4 es un ejemplo). Sin embargo, a pesar de que la densidad del aire es un factor que afecta a la sustentación no se menciona en dichas tablas, y esto tiene una explicación. Como veremos en el capítulo de instrumentación correspondiente, el indicador de velocidad es básicamente un medidor de presión. La presión que mueve la aguja de este indicador es la misma que la que mantiene las alas del avión en vuelo, es decir que este indicador no mide la velocidad del avión con respecto al suelo sino la velocidad aerodinámica ($1/2dv^2$), así que la variación de densidad que afecta a la sustentación afecta por igual al indicador de velocidad. El indicador de velocidad nos está haciendo un favor al funcionar así, y a este respecto debemos confiar en él puesto que hace por nosotros las correcciones adecuadas debido a los cambios de densidad. De modo que cuando el fabricante especifica velocidades de pérdida ya tiene en cuenta este detalle, y se refiere a valores dados por la lectura de este instrumento (IAS=Indicated Airspeed).

Es importante recordar que el ángulo de ataque se mide respecto al viento relativo, por tanto no cabe confiarse enteramente en la actitud del avión en cuanto a la posibilidad de una entrada en pérdida.

Sumario:

- La pérdida se produce en el ángulo de ataque crítico, que es el punto en el cual un incremento de ángulo de ataque no se traduce en un aumento de la sustentación.
- La sustentación no cae a cero en la pérdida. De hecho el coeficiente de sustentación tiene su valor máximo en la pérdida.
- En la pérdida, apenas hay capa laminar, casi toda es turbulenta.
- La velocidad de pérdida es la que corresponde al ángulo de ataque que provoca la entrada en pérdida, más un margen de seguridad del 5% a 10%.
- La velocidad de pérdida no es un valor único; varía con el peso del avión, la densidad del aire, la configuración del avión y el factor de carga.
- El factor de carga tiene una enorme influencia en la pérdida. La velocidad de pérdida se incrementa en un factor igual a la raíz cuadrada del factor de carga.
- Las velocidades de pérdida tabuladas por los fabricantes se refieren a situaciones estándar. Si la situación real es diferente, la velocidad de pérdida también es diferente.
- El amortiguamiento vertical en la pérdida cae a cero. Si el avión está bien diseñado, la raíz del ala entrará en pérdida antes que el extremo, y quedará un poco de amortiguamiento al alabeo.

- Igualmente, un buen diseño implica que en situaciones normales aunque las alas entren en pérdida, la cola del avión no lo hará.
- Un hecho muy importante es que si el avión no está en pérdida, tampoco entrará en barrena.
- En función del factor de carga soportado, los aviones son de categoría: Normal, Utility y Acrobatic.
- La velocidad de pérdida con flaps extendidos es menor que con ellos retraídos.

© M.A.Muñoz Mar/2002